

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»



Дмитрієв Вадим Сергійович

УДК 621.382.2/3

**ОМІЧНІ ТА ІНЖЕКТУЮЧІ БАР'ЄРНІ ПЕРЕХОДИ
ДО АРСЕНІДУ ГАЛІЮ**

05.27.06 - Технологія, обладнання та виробництво електронної техніки

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі мікроелектронних інформаційних систем Інженерного інституту Запорізького національного університету Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник - кандидат технічних наук, професор, заслужений працівник освіти України

Швець Євгеній Якович,

Запорізький інститут економіки та інформаційних технологій,

професор кафедри комп'ютерної інженерії

Офіційні опоненти – доктор технічних наук, старший науковий співробітник

Круковський Семен Іванович,

Науково-виробниче підприємство «Електрон-Карат» -

дочірнє підприємство ПрАТ «Концерн-Електрон»,

начальник відділу напівпровідникових матеріалів

і приладів на їх основі

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

Іващук Анатолій Васильович,

Національний технічний університет України «Київський

політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доцент

кафедри мікроелектроніки

Захист відбудеться «15» жовтня 2019 р. о 14:30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.08 в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, Київ-56, просп. Перемоги, 37, корп. 12, ауд. 412.

З дисертацією можна ознайомитись у Науково-технічній бібліотеці ім. Г.І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, Київ-56, просп. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «__» вересня 2019 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради

к.т.н., доцент



В. Г. Артюхов

Загальна характеристика роботи

Актуальність теми. У останні роки розвиток засобів мобільного зв'язку, високошвидкісних бездротових телекомунікаційних засобів та волоконно-оптичних систем потребує використання сучасних електронних приладів НВЧ діапазону, які виготовляються на основі електронного арсеніду галію. Одними з основних елементів НВЧ приладів є омічні та інжектуючі бар'єрні переходи, виготовлені, зокрема, на основі золота. Однак використання срібла, серед переваг якого більша тепло- та електропровідність, відносно невеликий коефіцієнт дифузії в арсенід галію та менша собівартість для створення таких переходів, має покращити технічні характеристики НВЧ приладів з бар'єрами Шотткі, зокрема, приладів з міждолинним електронним переходом (МЕП-приладів). Проблема недостатності знань про закономірності та особливості формування срібло-містких контактів метал-GaAs обумовлює необхідність подальших досліджень для удосконалення промислової технології виробництва GaAs приладів з металізацією на основі срібла. Електрофізичні параметри реальних поверхонь напівпровідників після обробки існуючими способами стають неоднорідними уздовж поверхні, а отже потребують розробки більш ефективних методів пасивації поверхні GaAs. Відомі дані про температурні режими створення бар'єрних переходів на GaAs дуже різняться. Дослідження впливу умов осадження металу та режимів термообробки контактів на електрофізичні параметри срібломістких контактів метал-GaAs варто виділити у самостійну наукову проблему, вирішення якої може привести до суттєвого уточнення уявлень про процеси у контактах метал-GaAs та дозволить покращити технічні характеристики та параметри НВЧ приладів з бар'єрами Шотткі на GaAs. Таким чином, дослідження закономірностей, розробка та оптимізація технологічних режимів відтворюваного отримання омічних та інжектуючих бар'єрних переходів на основі срібла до GaAs з оптимальними показниками якості та технологічності для приладів НВЧ діапазону є важливою і актуальною задачею з наукової та практичної точок зору.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Напрямок досліджень пов'язаний з науковою тематикою та тематикою навчального процесу кафедри мікроелектронних інформаційних систем факультету енергетики, електроніки та інформаційних технологій Запорізької державної інженерної академії. Частина досліджень виконувалась відповідно до цілей і завдань науково-дослідної роботи №7-*/д12, рег. № 0113U002791 «Радіант – Удосконалення технології створення напівпровідникових приладних структур», яка виконувалась в 2012-2013 рр. та в якій автор брав участь безпосередньо, як старший науковий співробітник.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є дослідження закономірностей, розробка та оптимізація технологічних режимів відтворюваного отримання омічних та інжектуючих бар'єрних переходів на основі срібла до арсеніду галію.

Для досягнення вказаної мети необхідно розв'язати наступні наукові завдання:

1. Провести комплекс теоретичних й експериментальних досліджень для поглиблення уявлень про фізичну природу контактних явищ в омічних та інжектуючих бар'єрних переходах, проаналізувати відповідні фізичні моделі,

визначити методи розрахунку основних параметрів контактів та дослідити вплив різних чинників на якість бар'єрних переходів до арсеніду галію.

2. Визначити контактні системи, найбільш перспективні з погляду можливості відтворюваного отримання омичних контактів з питомим перехідним опором не більше 10^{-4} Ом·см² та інжектуючих бар'єрних переходів з висотою потенційного бар'єру більше 0,95 В до арсеніду галію n-типу провідності.

3. Для покращення параметрів омичних та інжектуючих бар'єрних переходів розробити ефективні методи пасивації поверхні GaAs.

4. Дослідити та оптимізувати методи та режими формування омичних та інжектуючих бар'єрних переходів до GaAs.

5. Дослідити вплив методів розрахунку за вольт-амперними характеристиками інжектуючих бар'єрних переходів на точність визначення їх основних параметрів.

6. Дослідити можливість створення нових типів НВЧ приладів з бар'єрами Шотткі.

Об'єктом дослідження є контактні системи на основі срібла до n- GaAs.

Предметом дослідження є технологічні особливості формування омичних та інжектуючих бар'єрних переходів на основі срібла до n-GaAs для забезпечення оптимальних показників якості і технологічності.

Методи дослідження. Виконані дослідження базувались на фундаментальних положеннях фізики та технології напівпровідникових приладів. Були використані математичні та комп'ютерні методи розрахунку й моделювання, методи графічної обробки експериментальних даних, статистична обробка результатів вимірювань. Робота проводилася з використанням технологічної та вимірювальної бази ТОВ «Елемент-Перетворювач», ТОВ «Універсальне обладнання - Україна», ТОВ «Істрел», Запорізької державної інженерної академії.

Наукова новизна одержаних результатів.

В результаті проведення комплексних технологічних та електрофізичних досліджень одно- і багатокомпонентних металевих контактних систем на основі срібла до n-n⁺GaAs **вперше** отримані такі наукові результати:

1. Отримала подальший розвиток модель контакту метал-напівпровідник, яка описує процеси перенесення між електронами металу, граничними станами та вільними носіями напівпровідника, а також враховує фізичний механізм переміщення заряду у структурі метал-напівпровідник при відповідному підборі кінетичних коефіцієнтів у процесах перенесення.

2. Результати експериментальних досліджень доповнюють уявлення про закономірності формування контактів на основі срібла до арсеніду галію при різних температурних режимах та визначають умови стабілізації електрофізичних параметрів контактів у процесі їх створення.

3. Експериментально встановлено, що якісні показники омичних та інжектуючих бар'єрних переходів значно залежать від температури підкладки та режимів термообробки контактної структури, а саме:

- встановлено закономірності залежності питомого перехідного опору від температурних режимів створення омичних контактів Ag-Ge-In/n-n⁺GaAs, за яких відбувається зменшення питомого перехідного опору до мінімального

значення $(5...7) \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$; що на порядок менше у порівнянні з відомими аналогами;

- удосконалено та оптимізовано технологію виготовлення інжектуючих бар'єрних переходів $\text{Ag/n-n}^+\text{GaAs}$, яка враховує закономірності формування бар'єрних переходів при різних температурних режимах та визначено оптимальні режими, які обумовлюють зростання висоти бар'єру Шотткі до 0,98 В.

4. На основі розробленої спрощеної математичної моделі МЕР-приладів з бар'єрами Шотткі отримано співвідношення, які визначають закономірності нарощування у МЕР-приладах НВЧ коливань, залежність часу встановлення коливань від параметрів початкового матеріалу, геометричних розмірів робочого простору та режимів роботи. Також запропоновано і розроблено нові конструктивні та технологічні рішення зі створення МЕР-приладу на n-GaAs.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Запропоновано спосіб хімічної обробки GaAs-підкладки у сірчано-кислому травнику з подальшою витримкою у діоксіянтранній кислоті, який призводить до пасивації поверхні арсеніду галію і дає можливість отримати прийнятну щільність поверхневих станів відповідно запропонованої моделі та покращує якісні й технологічні показники омичних та інжектуючих бар'єрних переходів.

2. Запропоновано та розроблено нові способи виготовлення омичних та інжектуючих бар'єрних переходів на основі срібла до арсеніду галію ($\text{Ag-Ge-In/n-n}^+\text{GaAs}$ та $\text{Ag/n-n}^+\text{GaAs}$ відповідно) методом вакуумного випаровування, які дозволяють отримати наступні відтворювані контакти з оптимальними параметрами:

- низькоомні омичні контакти з питомим перехідним опором $(5...7) \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ за рахунок режимів термообробки, які включають нанесення плівки потрібного сплаву при температурі підкладки 420-470 К та відпал напильної структури при температурі 860 – 890 К;

- інжектуючі бар'єрні переходи з висотою потенційного бар'єру 0,96...0,98 В, при нанесенні срібла за умови температури підкладки 353-533 К та режимі термообробки контакту з відпалом при температурі 713-883 К.

3. Запропоновані технологічні режими виготовлення омичних і інжектуючих бар'єрних переходів можуть бути використані для створення багатоелектродного приладу на міждолинному електронному переході (МЕР-приладу), до складу якого введено керуючі електроди, виготовлені з однакового матеріалу з електродами з бар'єрами Шотткі. Розроблений прилад має розширені функціональні можливості і при визначених режимах може бути використаний у якості діода Шотткі, транзистора біжучої хвилі чи НВЧ-генератора.

Розроблені технологічні режими виготовлення відтворюваних омичних та інжектуючих бар'єрних переходів впроваджено у промислових умовах на ТОВ «Елемент-Перетворювач», ТОВ «Універсальне обладнання – Україна» та ТОВ «Істрел».

Результати, отримані у дисертаційній роботі, використано у методичному забезпеченні при вивченні дисципліни «Напівпровідникові квантові структури та надгратки» у навчальному процесі на кафедрі мікроелектронних

інформаційних систем факультету енергетики, електроніки та інформаційних технологій Запорізької державної інженерної академії.

Акти впровадження додаються. Новизна практичних розробок захищена патентами України.

Особистий внесок здобувача. Основні результати отримані автором особисто або при його особистій участі. Автор розробив методики проведення експериментів, виконав статистичну обробку отриманих результатів досліджень, брав участь у підготовці наукових публікацій та в розробці винаходів, покладених в основу дисертаційної роботи та захищених патентами України. Здобувачем встановлено закономірності залежності питомого перехідного опору від температурних режимів створення омичних контактів Ag-Ge-In/n-n⁺GaAs; удосконалено та оптимізовано технологію виготовлення інжектуючих бар'єрних переходів Ag/n-n⁺GaAs. Визначено закономірності нарощування у МЕР-приладах НВЧ коливань, запропоновано і розроблено нові конструктивні та технологічні рішення зі створення МЕР-приладу на n-GaAs.

У роботах, виконаних у співавторстві здобувачу належать наступні наукові результати: досліджено вплив режимів термообробки на контактний опір омичного контакту, висоту бар'єру Шотткі, фактор неідеальності та коефіцієнт інжекції; досліджено залежність коефіцієнта інжекції від струму для контактів з різною висотою потенційного бар'єру; досліджено вплив попередньої обробки поверхні напівпровідника на властивості контактів. Особистий внесок у спільно опублікованих працях конкретизовано в переліку наукових праць.

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень, викладені у дисертаційній роботі, були оприлюднені на: Всеукраїнській НТК «Фізика, електроніка, електротехніка: 2017» (2017 р., м. Суми, Сумський державний університет); VII Міжнародному молодіжному науковому форумі “Litteris et Artibus” (2017 р., м. Львів, Національний університет «Львівська політехніка»); VII Міжнародній науково-практичній конференції «Технічне регулювання, метрологія і інформаційні технології». (2017 р., м. Одеса, Одеська державна академія технічного регулювання та якості); Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Современные направления теоретических и прикладных исследований ‘2016» (2016 р., м. Одеса, Проект SWorld); Міжнародній НТК молодих вчених і студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (2015 р., м. Тернопіль, Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя); Міжнародному молодіжному форумі «Радіоелектроніка і молодь у XXI ст.» (2015 р., Харків, ХНУРЕ); XVIII, XX - науково-технічних конференціях студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів ЗДІА (2013, 2015 р., м. Запоріжжя, Запорізька державна інженерна академія); X міжнародній науково-практичній конференції «Modernn vymoženosti vědy – 2014». (2014 р., м. Прага, Чехія); Міжнародній науково-практичній конференції «Перспективні інновації у науці, освіті, виробництві та транспорті» (2013 р., м. Одеса, Одеський національний морський університет, проект SWorld); у патентах України на корисну модель UA 119116 (2017 р.); UA 119444 (2017 р.); UA 132132 (2019); наукових семінарах кафедри мікроелектронних інформаційних систем факультету енергетики, електроніки та інформаційних технологій Запорізької державної інженерної академії.

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 24 наукові праці, у тому числі 7 статей у наукових фахових виданнях (з них 7 у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 5 статей у інших наукових виданнях, 3 патенти на корисну модель, 9 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота викладена на 184 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Робота містить 152 сторінки основного тексту, 39 ілюстрацій, 16 таблиць, перелік використаних джерел зі 179 найменувань на 21 сторінці, 4 додатки наведено на 11 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** викладено загальну характеристику дисертації, обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та поставлені задачі досліджень, визначено наукову новизну та практичне значення результатів дисертації.

У **першому розділі** проаналізовано вплив різних чинників на якість омічних та інжектуючих бар'єрних переходів до арсеніду галію. Розглянуто фізичні моделі омічних та інжектуючих бар'єрних переходів метал-напівпровідник. Отримала подальший розвиток модель контакту метал-напівпровідник, яка дозволяє вивчити реальну структуру метал-напівпровідник з урахуванням впливу ефектів швидких та повільних станів та впливу проміжного окисного шару у цілому, і може враховувати будь-який фізичний механізм переміщення заряду у структурі метал-напівпровідник відповідним підбором кінетичних коефіцієнтів у процесах перенесення.

Визначено основні розрахункові співвідношення для опису різних видів інжекції у простих діодних структурах $R-p^+-n(p)-n^+-R$, які мають два активні інжектуючі бар'єрні переходи та омічні бар'єрні переходи до низькоомних областей, що можуть бути використані для розрахунку більш складних структур. Показано необхідність урахування впливу неосновних носіїв в області просторового заряду у контакті з бар'єром Шотткі, який призводить до появи залежності робочих характеристик НВЧ приладу від струму інжекції, накопичення заряду та спотворення поля в приконтактній області.

Існуючі технології виготовлення омічних та інжектуючих бар'єрних переходів на основі срібла до арсенід галію мають ряд недоліків, зокрема недостатню відтворюваність параметрів контактів. Наразі дослідження і розробку контактів метал-напівпровідник ведуть в напрямках пошуку нових мікроелектронних композицій на основі арсеніду галію та розробки технологічних режимів, які змогли б забезпечити відтворюваність параметрів НВЧ приладів з бар'єрами Шотткі (БШ). Аналіз властивостей контактних матеріалів до арсеніду галію показав, що срібло має більшу в порівнянні з золотом тепло- та електропровідність та відносно невеликий коефіцієнт дифузії в арсенід галію. Тому перехід до виготовлення бар'єрних переходів на основі срібла до арсеніду галію при визначеній концентрації легуючої домішки та правильно підібраних режимах нанесення й термообробки повинен підвищити технічні характеристики НВЧ приладів. На підставі аналізу підходів

дослідження омичних та інжектуючих бар'єрних переходів метал-арсенід галію сформульовано мету та завдання роботи.

Результати першого розділу опубліковано у роботах [10,11,20-24].

У другому розділі наведено методи контролю параметрів, характеристик омичних та інжектуючих бар'єрних переходів, НВЧ приладів. Для вимірювання вольт-амперних характеристик бар'єрних переходів метал-напівпровідник використовувалась модернізована схема, яка була розроблена на основі чотирьохзондового методу. Запропонована методика вимірювання опору омичного контакту компенсаційним методом. Питомий перехідний опір омичних контактів визначався за методом еквівалентних схем. Для дослідження інжекційних властивостей омичних контактів використано мостову схему та наведено методику дослідження інжекційних властивостей омичних бар'єрних переходів. Наведені методи розрахунку параметрів інжектуючих бар'єрних переходів (висоти бар'єру, фактору неідеальності, коефіцієнта інжекції). Розроблено схему для вимірювання параметрів НВЧ приладів.

Результати другого розділу опубліковано у роботі [12].

У третьому розділі наведено результати дослідження технології відтворюваного отримання багатокомпонентних омичних бар'єрних переходів (ОК) до арсеніду галію.

Параметри омичного неінжектуючого контакту метал-напівпровідник залежать від вибору матеріалів, режимів підготовки поверхні, методу нанесення плівки металу, морфології поверхні, режимів термообробки, структури межі розділу метал-напівпровідник, яка формується при виготовленні контакту. Основні проблеми омичних контактів до арсеніду галію (GaAs): відсутність рівномірного змочування металу, шорсткість поверхні, сегрегація металу у приконтактну область, наявність безлічі фаз метал-напівпровідник, ерозія поверхні контакту, недостатньо низький контактний опір, низька термостабільність електричних параметрів контактів, неконтрольоване протравлення межі розділу метал-напівпровідник при відпалі контакту та недостатня відтворюваність параметрів.

На основі аналізу відомих систем, які використовують для виготовлення омичних контактів до GaAs n-типу, для створення омичного контакту було обрано сплав срібло-германій-індій, що складається з 75% Ag, 20% Ge, 5% In. Досліджували омичні контакти, створені на епітаксійному монокристалічному $n\text{-}n^+\text{GaAs}$ (111)В, товщина епітаксійного шару $d_{\text{еш}}=2$ мкм, концентрація носіїв в епітаксійному шарі $N_D=(1\ldots3)\cdot 10^{16}$ см⁻³, концентрація носіїв у підкладці $n_{\text{підкл}}=10^{18}$ см⁻³, рухливість $\mu \geq 5000\ldots 7000$ см²/(В·с) при 300 К. Омичні контакти Ag-Ge-In/ $n\text{-}n^+\text{GaAs}$ виготовляли у вакуумі при залишковому тиску $p=(1,2\ldots 2)\cdot 10^{-6}$ Торр методом термічного випаровування.

Легування поверхні металом відбувається при обробці поверхні напівпровідника у розчинах, котрі містять домішки різних металів. Особливість сполук A_3B_5 полягає у різній швидкості розчинення напівпровідників на площині (111) з гранями А і В, у яких різний характер хімічних зв'язків поверхневих атомів підкладки. При однаковому травнику сторона (111) В полірується (гладка, дзеркальна), сторона (111) А – матова з розвинутою мозаїчною структурою.

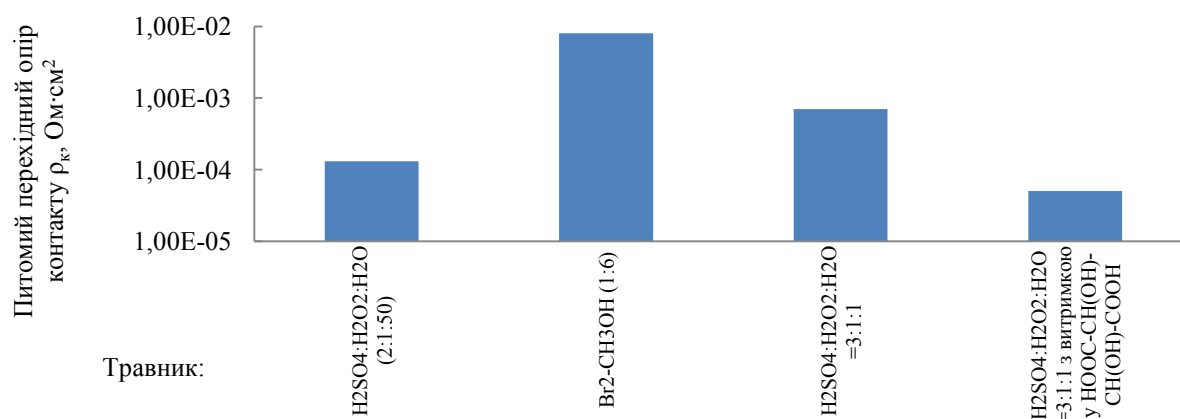


Рисунок 1- Порівняльний аналіз впливу способу хімічної обробки GaAs-підкладки на питомий перехідний опір контактів на основі срібла

Хімічне полірування напівпровідникової підкладки проводять з метою згладжування нерівностей та зменшення шорсткості поверхні. Результати досліджень впливу різних травників на перехідний контактний опір контактів Ag-Ge-In/n-n⁺GaAs дозволили рекомендувати технологію попередньої обробки GaAs-підкладки, яка знижує питомий перехідний опір омичного контакту Ag-Ge-In/n-n⁺GaAs: знежирення в суміші толуолу і метилового спирту (1:2), хімічне полірування в суміші 3H₂SO₄-1H₂O₂-1H₂O, багаторазове промивання в гарячій і холодній дистильованій та деіонізованій воді, промивання в метиловому спирті (рисунок 1).

Експериментально доведено, що якість омичного контакту поліпшується, якщо GaAs-підкладку після хімічної обробки у сірчаноокислому травнику витримати у діоксіянтарній кислоті HOOC-CH(OH)-CH(OH)-COOH протягом $1,2 \cdot 10^3$ секунд (рисунок 1) та додатково відпалити у вакуумі не гірше, ніж $1,2 \cdot 10^{-6}$ Торр при температурі 873 К впродовж 60 секунд (таблиця 1).

Експериментально досліджено залежність питомого перехідного опору переходу Ag-Ge-In/n-n⁺GaAs від режиму нанесення та термообробки контактів. Проведення відпалу контакту необхідно для введення до області межі контакту домішки або дефектів. Відомі дані за оптимальними режимами термообробки контактів дуже суперечливі.

Таблиця 1 - Питомий перехідний опір контактів ρ_k , підкладка яких пройшла попередній відпал

Температура попереднього відпалу GaAs-підкладки, К	Питомий перехідний опір контактів ρ_k , Ом·см ²				
	Партії GaAs-пластин				
	№1	№2	№3	№4	№5
673	$9 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$
698	$8,6 \cdot 10^{-2}$	$7,50 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$7,5 \cdot 10^{-2}$	$4,3 \cdot 10^{-2}$
723	$8 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$9 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$
748	$7,15 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$9 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$
773	$6 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$
798	$6 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$
823	$7 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$
848	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$
873	$8 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$
Час відпалу, с	30	60	90	120	150

У кожному окремому випадку опір контактів дуже критичний до режиму відпалу. Формування омичного контакту шляхом відпалу проводилося у вакуумі $(1,2...2) \cdot 10^{-6}$ Торр.

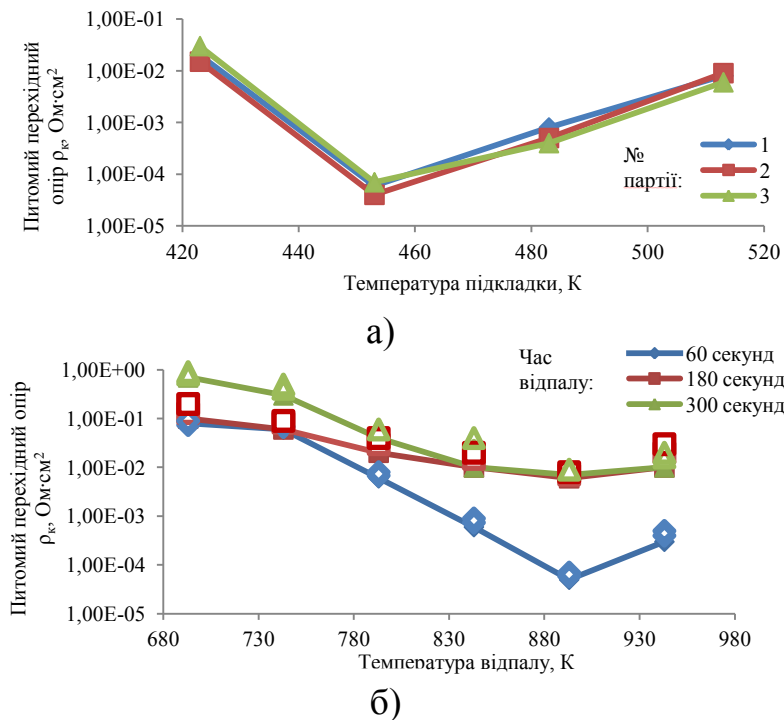


Рисунок 2 - Залежність питомого перехідного опору омичних контактів Ag-Ge-In/n-n⁺GaAs від температури підкладки при нанесенні металу (а) та температури та часу відпалу контакту (б)

вплив на величину питомого перехідного опору швидкості підйому температури відпалу та швидкості охолодження зразків після відпалу. На рисунку 3 наведено вольт-амперну характеристику омичного контакту Ag-Ge-In/n-n⁺GaAs. Лінійність ВАХ омичних контактів не порушувалась при нагріві до температури 453 K.

Результати дослідження технології виготовлення омичних контактів:

1. Розроблено технологію відтворюваного отримання багатокомпонентних омичних контактів Ag-Ge-In/n-n⁺GaAs.

2. Експериментально досліджено залежність питомого перехідного контактного опору

Процеси попереднього відпалу GaAs підкладки, нанесення потрібного сплаву методом термічного випаровування на підкладку та термообробка одержаної структури контакту проводилися у єдиному вакуумному циклі.

Експериментально досліджено вплив на питомий перехідний опір контакту Ag-Ge-In/n-n⁺GaAs температури підкладки при термічному випаровуванні матеріалу контакту (рисунок 2,а), температури та часу відпалу (рисунок 2,б),

швидкості підйому температури відпалу та швидкості охолодження контакту.

Результати експерименту показали незначний

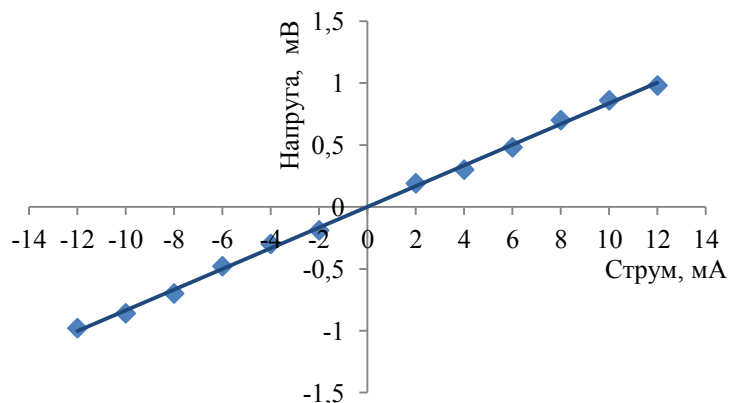


Рисунок 3 – Вольт-амперна характеристика омичного контакту Ag-Ge-In/n-n⁺GaAs, $T_{\text{відп.}}=893$ K, $\tau_{\text{відп.}}=60$ с

від хімічної та термічної обробки підкладки, умов осадження плівки потрійного сплаву Ag-Ge-In (75% Ag, 20% Ge, 5% In) та режимів термообробки омичних контактів:

- доведено, що попередній температурний відпал у вакуумі GaAs-підкладки при 873 K впродовж 60 секунду у вакуумі після хімічної обробки у сірчанокиислому травнику та діоксіантарній кислоті знижує питомий перехідний опір омичного контакту;

- встановлено, що омичні контакти Ag-Ge-In/n-n⁺GaAs мають питомий перехідний опір $\rho_k = (5...7) \cdot 10^{-5}$ Ом·см² при нанесенні матеріалу контакту на підігріту до температури 453 K підкладку і відпалу отриманої структури при 893 K упродовж 60 с у вакуумі, швидкості підйому температури відпалу 7,2 K/с і швидкості охолодження контакту після відпалу 4,75 K/с. Лінійність ВАХ омичних контактів не порушувалась при нагріві до температури 453 K.

Запропонований спосіб захищено патентом України на корисну модель.

Результати третього розділу опубліковано у роботах [2-5,8,12,13,17].

У четвертому розділі наведено результати дослідження технології відтворюваного отримання інжектуючих бар'єрних переходів (бар'єрів Шотткі) до арсеніду галію. За результатами попередніх досліджень в якості бар'єрного матеріалу обрано срібло високої чистоти (99,999). Срібло утворює з GaAs сполуки, які не змінюються в робочому діапазоні температур. Ag володіє відносно невеликим коефіцієнтом дифузії в арсенід галію у порівнянні, наприклад, з Au, що дозволяє зменшити товщину перехідного шару.

До недоліків відомих технологій виготовлення інжектуючих бар'єрних переходів Ag/n-n⁺GaAs відносять недостатню термостабільність контакту та низьку відтворюваність результатів. Тому дослідження вели у напрямку розробки технології виготовлення відтворюваних інжектуючих бар'єрних переходів Ag/n-n⁺GaAs, яка забезпечить більш високі значення висоти потенційного бар'єру, поліпшення морфології поверхні контакту й, як наслідок, поліпшення характеристик приладів, в яких використовуються такі контакти.

Інжектуючі бар'єрні переходи виготовляли на епітаксійному монокристалічному n-n⁺GaAs(111)В ($d_{\text{е.ш.}} = 2$ мкм, $N_D = (1...3) \cdot 10^{16}$ см⁻³, $n_{\text{підкл.}} = 10^{18}$ см⁻³, $\mu \geq 5000...7000$ см²/(В·с) при 300 K методом вакуумного випаровування при залишковому тиску не гірше $2 \cdot 10^{-6}$ Торр.

Обробка поверхні напівпровідника проводиться за допомогою різних хімічних процесів в ході виготовлення приладів. Хоча багато хто ці процеси називає очищенням, насправді вони полягають в утворенні хімічно сполучених з нею плівок, які, будучи закінченням ґраток, забезпечують прийнятну щільність поверхневих станів. Якщо поверхня напівпровідника підготовлена так, що зміна електричного поля на поверхні, виникаюча в процесі роботи приладу, і зміни в зовнішньому середовищі помітно не змінюють характеристики приладу, то вона є пасивованою. Арсенід галію відрізняється від металів й елементарних напівпровідників структурними особливостями, обумовленими наявністю в ньому двох типів атомів, тому кінетичні закономірності як у стадії окислення, так і у стадії розчинення окислених форм набувають складного характеру. Хімічній обробці GaAs присвячено достатньо

робіт, але питання кінетики та механізмів реакцій в цих системах все ще не можна вважати вирішеними.

Результати порівняльного аналізу залежності висоти бар'єру $\text{Ag}/\text{n-n}^+\text{GaAs}$ від технології попередньої обробки GaAs-підкладки наведено на рисунку 4.

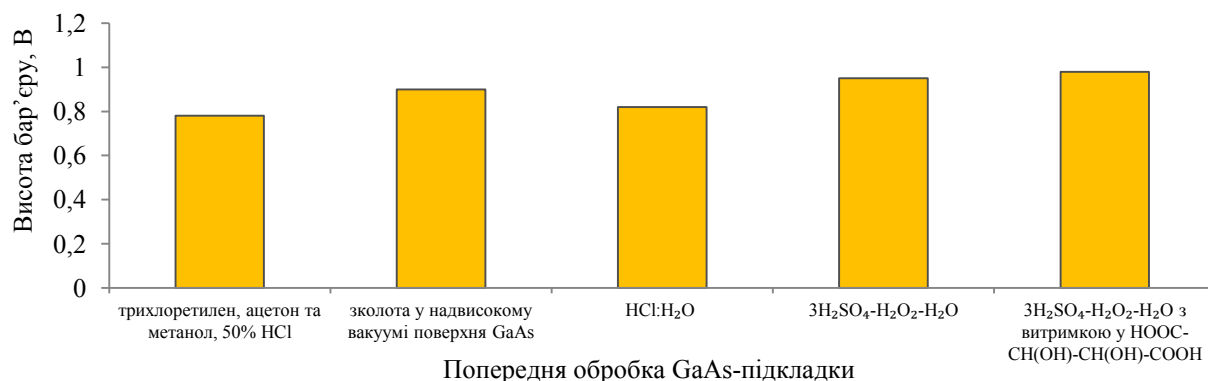
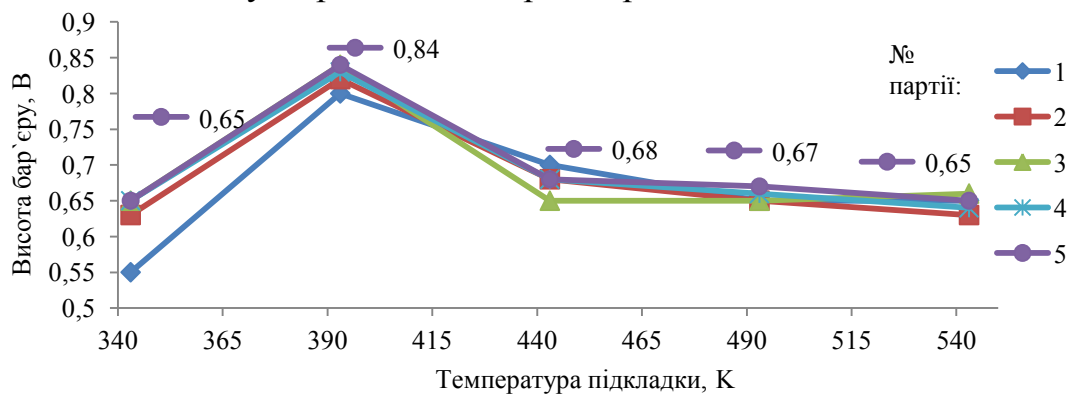
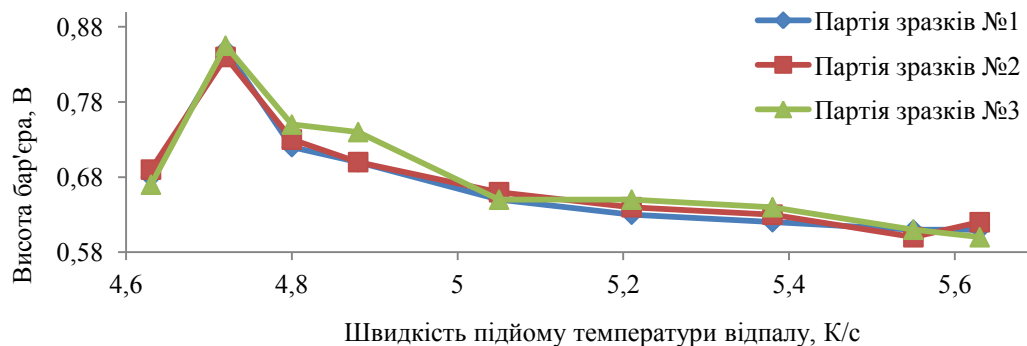


Рисунок 4 – Порівняльний аналіз залежності висоти бар'єру $\text{Ag}/\text{n-n}^+\text{GaAs}$ від способу попередньої обробки GaAs-підкладки

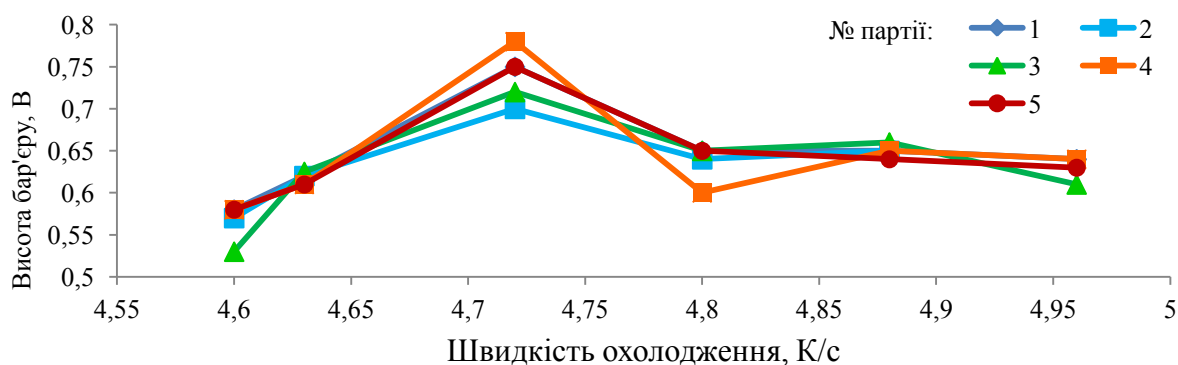
До критеріїв оцінки якості інжектуючого бар'єрного переходу відносять його висоту $\Phi_{\text{Вп}}$, що визначали за методом вольт-амперної характеристики, фактор неідеальності, коефіцієнт інжекції, ВАХ. При нанесенні на GaAs-підкладку плівки срібла методом вакуумного випаровування за рахунок теплоти конденсації та можливих хімічних реакцій відбувається руйнування ґратки в приповерхневому шарі напівпровідника ще до формуванні суцільної металевої плівки. Наслідки цієї стадії значною мірою визначаються умовами виготовлення контакту та режимами термообробок.



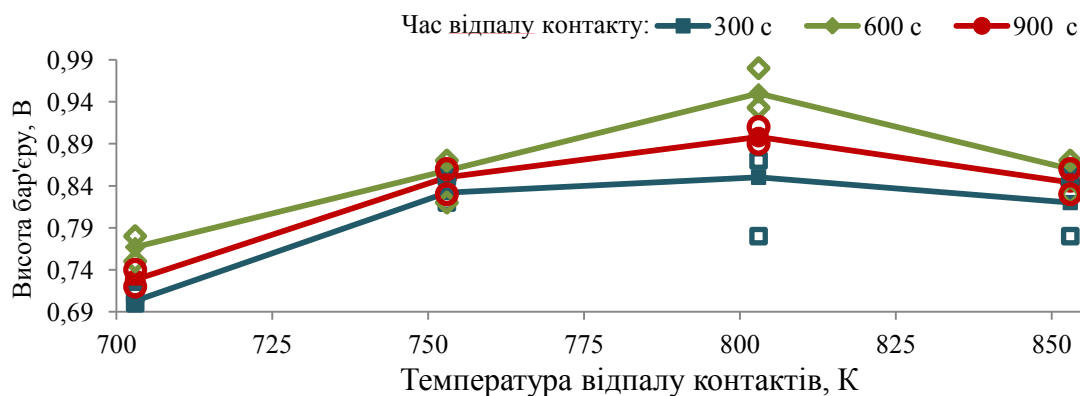
а)



б)



В)



Г)

Рисунок 5 - Залежність висоти бар'єру Шотткі $\text{Ag/n-p}^+\text{GaAs}$ від режимів нанесення плівки та термообробки контакту

Експериментально досліджено вплив режимів нанесення металу (рисунок 5,а), швидкості підйому температури відпалу (рисунок 5,б) та швидкості охолодження після відпалу (рисунок 5,в), температури відпалу контакту (рисунок 5,г).

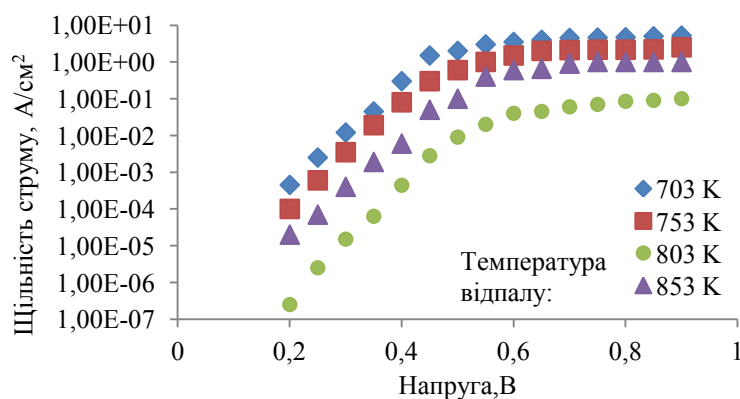


Рисунок 6 – Прямі вольт-амперні характеристики контактів $\text{Ag/n-p}^+\text{GaAs}$, виготовлених при різних температурах відпалу (час відпалу $\tau_{\text{відп}} = 6 \cdot 10^2$ секунд)

Реальні вольт-амперні характеристики бар'єрних переходів метал-напівпровідник залежать від технології їх виготовлення (рисунок 6).

Точність основних якісних показників бар'єрних переходів (висоти бар'єру ϕ_B і фактору неідеальності η) залежить від точності вимірювання струму і напруги, а також від методу їх визначення.

Розглянуті та апробовані методи визначення висоти бар'єру Шотткі та фактору неідеальності за вольт-амперними характеристиками на прикладі бар'єрних

переходів Ag/n-n⁺GaAs, виготовлених за різних режимів термообробки (таблиця 2).

Таблиця 2 - Параметри бар'єрних переходів Ag/n-n⁺GaAs, розраховані за ВАХ різними методами

№ партії	T _{відп} , K	Метод розрахунку	η	ϕ_{bn} , В	R _s , Ом
1	703	direct approx.	1,254	0,773	0,22
		Rhoderick	1,204	0,784	-
		Williams	1,095	0,78	-
		Size	1,176	0,78	-
2	753	direct approx.	1,249	0,805	0,76
		Rhoderick.	1,3	0,8	-
		Williams	1,22	0,87	-
		Size	1,176	0,87	-
3	803	direct approx.	1,087	0,984	3,7
		Rhoderick	1,104	0,98	-
		Williams	1,376	0,98	-
		Size	1,276	0,98	-
4	853	direct approx.	1,328	0,849	1,03
		Rhoderick	1,34	0,847	-
		Williams	1,207	0,86	-
		Size	1,142	0,86	-

Завдяки проведеному порівняльному аналізу результатів розрахунку параметрів БШ за ВАХ різними методами встановлено (таблиця 2), що найбільш простим в реалізації є метод розрахунку параметрів вольт-амперних характеристик за методом Rhoderick (рисунок 7,б).



а)



б)

Рисунок 7 – Результати автоматизованого розрахунку параметрів інжектуючих бар'єрних переходів Ag/n-n⁺GaAs за ВАХ (T_{відп}=803 K, τ_{відп}=6·10² секунд)

Однак цей метод не враховує вплив послідовного опору, через що можуть виникати додаткові помилки при визначенні ділянки вольт-амперної характеристики, де цим впливом нехтують. Найбільш точним є розрахунок за методом *direct approximation* (рисунк 7,а), що враховує вплив послідовного опору при розрахунку фактора неідеальності та висоти бар'єру Шотткі.

На основі експериментальних досліджень встановлено, що висота бар'єру ϕ_{Bn} , яка визначається за ВАХ, є чутливою до напруги. Нелінійний характер вольт-амперної характеристики інжектуючих бар'єрних переходів Ag до $n-n^+GaAs$ виявляється у області зміщень, обмеженій ділянкою між 0,44...0,74 В, що призводить відповідно й до зміни фактору неідеальності η . Також розраховані коефіцієнти інжекції для переходів Ag/ $n-n^+GaAs$ з різною висотою бар'єру Шотткі.

Результати дослідження технології виготовлення відтворюваних інжектуючих бар'єрних переходів Ag/ $n-n^+GaAs$:

1. Експериментально досліджено залежність параметрів та характеристик інжектуючих бар'єрних переходів Ag до $n-n^+GaAs$ від технології виготовлення методом вакуумного випаровування. Визначено оптимальні режими нанесення та формування інжектуючих бар'єрних переходів з характеристиками, близькими до ідеальних ($\eta=1,087$).

2. Розроблено технологію термообробки у вакуумі бар'єрних переходів, який дозволяє збільшити висоту бар'єру Шотткі ϕ_{Bn} до 0,96...0,98 В і зменшити коефіцієнт інжекції γ до 10^{-8} : температура підкладки під час наплення 393 К, температурі відпалу 803 К, час відпалу $6 \cdot 10^2$ секунд, швидкість підйому температури відпалу та охолодження відповідно $V_{нагр}=4,72$ К/с; $V_{охол}=4,72$ К/с.

3. На основі експериментальних досліджень встановлено, що висота бар'єру ϕ_{Bn} , яка визначається за ВАХ, є чутливою до напруги. Нелінійний характер вольт-амперної характеристики інжектуючих бар'єрних переходів Ag до $n-n^+GaAs$ виявляється у області зміщень, обмеженій ділянкою між 0,44...0,74 В, що призводить відповідно й до зміни фактору неідеальності η .

4. Визначено, що для бар'єру Шотткі Ag/ $n-n^+GaAs$ з $\phi_{Bn}=0,98$ В при температурі 300 К фактор неідеальності змінюється від $\eta=1,087$ до $\eta=1,376$ за результатами розрахунків за ВАХ чотирма різними методами.

5. При невеликій протяжності експонентної ділянки ВАХ для визначення висоти потенційного бар'єру та фактору неідеальності розрахунок за методом *direct approximation* є найбільш точним, оскільки він враховує послідовний опір і ділянку ВАХ при $V < kT/q$.

Запропонований спосіб захищено патентом України на корисну модель.

Результати четвертого розділу опубліковані у роботах [1,6-9,14,18-19].

У п'ятому розділі запропоновано спрощену математичну модель МЕР-приладу з бар'єрами Шотткі, яка може бути використана для розрахунку параметрів складних багатофункціональних МЕР-приладів з кількома керуючими електродами. На основі математичної моделі розроблено новий багатоелектродний МЕР-прилад, котрий складається з двох електродів з омичними контактами та розташованих поблизу них і паралельних їм двох електродів з бар'єрами Шотткі, у якого над областю розповсюдження біжучої хвилі додатково виконані керуючі електроди, виготовлені з однакового матеріалу з електродами з бар'єром Шотткі. Цей прилад при визначених

режимах додатково може виконувати функції діоду Шотткі, транзистору біжучої хвилі або НВЧ генератору.

Запропонований прилад захищено патентом України на корисну модель.

Результати п'ятого розділу опубліковані у роботі [8,15].

ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У дисертації вирішено актуальну науково-практичну задачу розробки та оптимізації технологічних режимів відтворюваного отримання низькоомних омичних контактів та інжектуючих бар'єрних переходів на основі срібла до GaAs n-типу, що дозволило розробити новий підхід до побудови МЕР-приладу на їх основі.

На основі аналізу проведених досліджень одержано наступні теоретичні та науково-практичні результати, які дозволяють стверджувати, що поставлені задачі вирішено, а мета роботи досягнута:

1. Запропоновано модель контакту метал-напівпровідник, яка базується на процесах перенесення між електронами металу, граничними станами і вільними носіями, враховує фізичний механізм переміщення заряду у структурі метал-напівпровідник відповідним підбором кінетичних коефіцієнтів у процесах перенесення.

2. Досліджено та запропоновано спосіб хімічної обробки, який призводить до пасивації поверхні арсеніду галію та дає можливість отримати прийнятну щільність поверхневих станів відповідно запропонованої моделі. Встановлено, що якість омичних та інжектуючих бар'єрних переходів покращується, якщо GaAs-підкладку після хімічної обробки у сірчанокислоту травнику додатково витримати у діоксіянтраній кислоті впродовж $1,2 \cdot 10^3$ секунд.

3. На основі експериментальних досліджень розроблені оптимальні температурні режими відтворюваного отримання у вакуумі омичного контакту Ag-Ge-In/n-n⁺GaAs, при яких значення питомого перехідного опору омичного контакту знижується до $\rho_k = (5 \dots 7) \cdot 10^{-5}$ Ом·см², а саме попередній температурний відпал GaAs-підкладки при 873 К, температура підкладки при нанесення матеріалу контакту - 453 К, відпал отриманої структури при 893 К упродовж 60 с, швидкість підйому температури відпалу 7,2 К/с, швидкість охолодження контакту після відпалу 4,75 К/с. При цьому попередня термообробка, підвищення температури підкладки до заданої, осадження плівки потрібного сплаву, подальший відпал напиленої плівки проводяться у єдиному вакуумному циклі за вищезазначених умов, що дозволяє отримувати металеві плівки без забруднень. На відміну від аналогів питомий перехідний опір контакту на основі срібла зменшується на порядок та є близьким до відповідних параметрів контактів на основі золота. Отримані контакти не змінюють свої властивості в інтервалі температур від 273 К до 453 К і мають лінійну вольт-амперну характеристику. Запропонований спосіб захищено патентом України на корисну модель.

4. На основі експериментальних досліджень встановлено та рекомендовано оптимальні температурні режими формування у єдиному вакуумному циклі інжектуючих бар'єрних переходів Ag/n-n⁺GaAs з висотою потенційного бар'єру 0,98 В, коефіцієнтом інжекції $\gamma = 10^{-8}$, фактором неідеальності $\eta = 1,087$: температура підкладки під час напилення 393 К, температура відпалу 803 К, час

відпалу $6 \cdot 10^2$ секунд, швидкість підйому температури відпалу та охолодження відповідно $V_{\text{нагр}}=4,72$ К/с; $V_{\text{охол}}=4,72$ К/с. Запропонований спосіб захищено патентом України на корисну модель.

5. Встановлено, що точність основних якісних показників бар'єрних переходів (висоти потенційного бар'єру ϕ_B і фактору неідеальності η) залежить не тільки від точності вимірювання струму і напруги, але й від методу їх визначення. Показано, що для бар'єру Шотткі Ag/n-n⁺GaAs з $\phi_{Bn}=0,98$ В при температурі 300 К фактор неідеальності змінюється від $\eta=1,087$ до $\eta=1,376$ за результатами розрахунків за вольт-амперними характеристиками чотирма різними методами. При невеликій протяжності експонентної ділянки ВАХ для визначення висоти потенційного бар'єру рекомендується метод direct approximation, оскільки він враховує послідовний опір і ділянку ВАХ при $V < kT/q$.

6. Результати експериментальних досліджень дозволили доповнити уявлення про закономірності формування контактів на основі срібла до арсеніду галію при різних температурних режимах, визначити умови стабілізації електрофізичних параметрів та рекомендувати розроблені режими термообробки контактних структур при виготовленні МЕР-приладу з бар'єрами Шотткі.

7. На основі запропонованої спрощеної математичної моделі МЕР-приладу з бар'єрами Шотткі розроблено багатоелектродний МЕР-прилад з розширеними функціональними можливостями, до складу якого входять керуючі електроди, розташовані над областю розповсюдження біжучої хвилі. Вказаний прилад при визначених режимах здатен виконувати функції діоду Шотткі, транзистору біжучої хвилі або НВЧ генератору, що дозволить отримати техніко-економічний ефект за рахунок зменшення витрат на розробку ряду приладів НВЧ діапазону. Запропонований прилад захищено патентом України на корисну модель.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях

1. Дмитрієв В. С. Вплив термічної обробки на вольт-амперну характеристику та інжекційні властивості гетеропереходу Ag/n-n⁺GaAs. *Радиоэлектроника, информатика, управление*. Запоріжжя, 2018. № 2. С. 7-13. DOI: 10.15588/1607-3274-2018-2-1. (фахове видання, індексується у **Web of Science Core Collection, Google Scholar, Index Copernicus International, RSCI**).

2. Дмитрієв В. С. Вплив способу обробки поверхні GaAs-підкладки на питомий перехідний опір омичних контактів на основі срібла. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. Хмельницький, 2018. №3. С. 258-263. (фахове видання, індексується у **Google Scholar, Index Copernicus International, RSCI, Polish Scholarly Bibliography**).

3. Дмитрієв В. С. Дослідження основних чинників впливу на якість омичних контактів до тонкоплівкового НВЧ приладу на n-GaAs. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. Херсон, 2018. №1. С. 188-193. (фахове видання, індексується у **Google Scholar, RSCI**).

4. Дмитрієв В. С. Омічні контакти на основі срібла для НВЧ приладів. *Перспективні технології та прилади*. Луцьк, 2017. Вип. 10(1). С. 54-57. ISSN 2313-5352. (фахове видання, індексується у **Google Scholar**).

5. Дмитрієв В. С. Багатокомпонентні омічні контакти до GaAs. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*: електрон. наук. фахове вид. 2017. № 3. С.1-6. ISSN 2307-5376. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/517>. (фахове видання, індексується **Google Scholar**)

6. Дмитрієв В. С. Інжектуючі бар'єрні переходи на основі арсеніду галію для приладів НВЧ діапазону. *Перспективні технології та прилади*. Луцьк, 2017. Вип. 10(1). С.50-53. ISSN 2313-5352. (фахове видання, індексується у **Google Scholar**).

7. Дмитрієв В. С. Оптимізація режимів формування інжектуючих бар'єрних переходів на основі срібла до арсеніду галію. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. Вінниця, 2017. № 4, С. 88-92. ISSN 1997-9266. (фахове видання, індексується у **Google Scholar, Index Copernicus International, RSCI**).

Статті в інших наукових виданнях України

8. Дмитриев В. С., Дмитриева Л. Б., Шве́ц Е. Я. Технологические особенности изготовления СВЧ прибора с барьерами Шоттки. *Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника*. Киев, 2018. Т. 61, № 2, С. 108-116, DOI: 10.20535/S002134701802005X. (індексується у: **Scopus, Google Scholar, Web of Science Core Collection, RSCI**). *Особистий внесок дисертанта: дослідження впливу режимів термообробки на контактний опір омічного контакту, висоту бар'єру Шоттки, фактор неідеальності та коефіцієнт інжекції*.

9. Дмитриев В. С. Влияние методов определения параметров барьерного перехода на их точность. *Журнал нано- та електронної фізики*. Суми, 2017. Вип. 9, № 5. С. 05037-1 – 05037-5. DOI: 10.21272/jnep.9(5).05037. (індексується у **Scopus, Google Scholar, Index Copernicus International**).

10. Dmitriev V. S. The modeling of the metal-semiconductor barrier transitions, which based on the chemical interaction. *SworldJournal*. 2016. Vol. 10. P. 55–58. URL: <http://www.sworld.com.ua/e-journal/jl11610.pdf>. (індексується у **Google Scholar, Index Copernicus International, RSCI**)

11. Дмитриев В. С. Моделирование барьерных переходов металл-полупроводник на основе химического взаимодействия. *Научные труды Sword*. Иваново: 2016. Вып. 1(42), Т.4. С. 38–42. (індексується у **Google Scholar, RSCI**).

12. Дмитриев В. С., Шве́ц Е. Я. Анализ экспресс-методов исследования инжекционных свойств невыпрямляющих контактов. *Сборник научных трудов Sword*. Иваново, 2013. Вып. 4, Т. 8. С. 59–63. (ISSN2224-0187). (індексується у **Google Scholar, RSCI**). *Особистий внесок дисертанта: експериментальні дослідження інжекційних властивостей омічних контактів*.

Патенти України

13. Спосіб виготовлення омічного контакту до GaAs: пат. 119444 Україна: МПК H01L 21/28. № u201703416; заявл. 10.04.17; опубл. 25.09.17, Бюл. № 18. 5

с. *Особистий внесок дисертанта: участь у виконанні досліджень, інтерпретації результатів.*

14. Спосіб виготовлення контактів з бар'єром Шотткі до GaAs: пат. 119116 Україна: МПК Н 01 L 29/47. № u201703427; заявл. 10.04.17; опубл. 11.09.17, Бюл. №17. 5 с. *Особистий внесок дисертанта: участь у виконанні досліджень, інтерпретації результатів.*

15. Багатоелектродний МЕР-прилад: пат. 132132 Україна: МПК H01L 29/41, 45/02. № u201809445; заявл. 19.09.18; опубл. 11.02.19, Бюл. № 3. 5 с.

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

16. Дмитрієв В. С. Оптимізація режимів термічної обробки гетероструктури на арсеніді галію. *Фізика, електроніка, електротехніка: 2017: Матеріали НТК.*(Суми, 17-21 квітня 2017 р.). Суми, 2017. С. 110.

17. Dmitriev V. Influence of heat treatment on the main quality indicators of heterojunctions Ag/n-n⁺GaAs. "*Litteris et Artibus*": Матеріали VII міжнародного молодіжного наукового форуму (Львів, 23-25 листопада 2017 р.). Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2017. С. 402-403.

18. Дмитриев В. С. Точность определения параметров гетеропереходов методом вольт-амперной характеристики. *Технічне регулювання, метрологія і інформаційні технології*: матеріали VII Міжнародної наук.-практ. конф. (Одеса, 10-11 жовтня 2017 р.) Одеса: ОДАТРА, 2017. С. 63-64. (індексується у **Google Scholar**).

19. Дмитрієв В. С., Швець Є. Я. Дослідження впливу рівня інжекції неосновних носіїв заряду у контактах метал-напівпровідник на параметри напівпровідникових приладів НВЧ діапазону. *XX НТК студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів ЗДІА*: матеріали XX наук.-техн. конф. студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів ЗДІА (Запоріжжя, 20-24 квітня 2015 р.). Запоріжжя: ЗДІА, 2015. Т. 3. С.3. *Особистий внесок дисертанта: дослідження залежності коефіцієнта інжекції від щільності струму для зразків різної товщини.*

20. Швець Є. Я., Дмитрієв В. С. Аналіз основних розрахункових співвідношень для опису різних видів інжекції. *XX НТК студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів ЗДІА*: матеріали XX наук.-техн. конф. студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів ЗДІА (Запоріжжя, 20-24 квітня 2015 р.). Запоріжжя: ЗДІА, 2015. Т. 3. С.4. *Особистий внесок дисертанта: аналіз простих діодних структур, за допомогою яких може бути здійснено класичну або подвійну інжекцію.*

21. Дмитриев В. С., Швець Е. Я. Экспериментальные исследования влияния уровня инжекции неосновных носителей заряда в контактах металл-арсенид галлия на параметры приборов микроволнового диапазона с барьерами Шоттки. *Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке*: материалы 19-го междунар. молодежного форума (г. Харьков, 20-22 апреля 2015 г.). Харьков: ХНУРЭ, 2015. Т. 1. С. 17–18. *Особистий внесок дисертанта: дослідження залежності коефіцієнта інжекції від струму для контактів з різною висотою потенційного бар'єру.*

22. Дмитрієв В., Швець Є. Вплив інжектіваних неосновних носіїв заряду на параметри діоду з бар'єром Шоттки. *Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій*: зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф. присвяч. 55-річчю заснув. ТНТУ та 170-річчю з дня народж. І. Пулюя (Тернопіль, 19–21 травня 2015 р.). Тернопіль: ТНТУ, 2015. С. 10–11. (індексується у **Google Scholar**). *Особистий внесок дисертанта: теоретичні дослідження впливу просторового заряду на основні характеристики приладів з бар'єрами Шоттки*.

23. Дмитриев В. С. Развитие физической модели неоднородных контактов металл-полупроводник. *Moderní vymoženosti vědy – 2014: materialy X mezinárodní vědecko-praktická konference (Praha, 27.01-05.02.2014)* Praha: Publishing House «Education and Science», 2014. Díl 39 «Technické vědy». С. 3–5. (ISBN 978-966-8736-05-6).

24. Dmitriev V. S., Shvets E. Y. The influence of the semiconductor's surface states on straightening properties of devices. *XVIII НТК студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів ЗДІА*: матеріали XVIII наук.-техн. конф. студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів ЗДІА (Запоріжжя, 15-19 квітня 2013 р.). Запоріжжя: ЗДІА, 2013. Т. 3. – С. 6. *Особистий внесок дисертанта: дослідження впливу попередньої обробки поверхні напівпровідника на властивості контактів*.

АНОТАЦІЯ

Дмитрієв В. С. Омічні та інжектуючі бар'єрні переходи до арсеніду галію - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.27.06 - Технологія, обладнання та виробництво електронної техніки. – Інженерний інститут Запорізького національного університету, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2019.

Дисертаційну роботу присвячено розробці технології відтворюваного отримання омічних та інжектуючих бар'єрних переходів на основі срібла до арсеніду галію n-типу провідності.

Розроблено технологію відтворюваного отримання омічних контактів Ag-Ge-In/n-n⁺GaAs, яка забезпечує лінійну ВАХ, коефіцієнт інжекції $\gamma=0,07\dots0,00$, контактний опір $(5\dots7)\cdot10^{-5}$ Ом·см².

Розроблено технологію відтворюваного отримання інжектуючих бар'єрних переходів Ag/n-n⁺GaAs з висотою потенційного бар'єру 0,98 В, коефіцієнтом інжекції $\gamma=10^{-8}$, коефіцієнтом неідеальності $\eta=1,087$.

Розроблені технології нанесення контактного матеріалу та режимів термообробки при створенні омічних та інжектуючих бар'єрних переходів рекомендуються до використання при виготовленні багатеелектродного МЕР-приладу з розширеними функціональними можливостями, до складу якого входять керуючі електроди, розташовані над областю розповсюдження біжучої хвилі.

Ключові слова: GaAs, омічні та інжектуючі бар'єрні переходи, коефіцієнт інжекції, срібло, потрійний сплав, МЕР-прилад.

АННОТАЦИЯ

Дмитриев В. С. Омические и инжектирующие барьерные переходы к арсениду галлия - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.06 - Технология, оборудование и производство электронной техники. - Инженерный институт Запорожского национального университета, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», 2019.

Диссертационная работа посвящена разработке технологии воспроизводимого получения омических и инжектирующих барьерных переходов на основе серебра к арсениду галлия n-типа проводимости.

Разработана технология воспроизводимого получения омических контактов Ag-Ge-In/n- n^+ GaAs, которая обеспечивает линейную ВАХ, коэффициент инжекции $\gamma=0,07...0,00$, контактное сопротивление $(5...7) \cdot 10^{-5}$ Ом см².

Разработана технология воспроизводимого получения инжектирующих барьерных переходов Ag/n- n^+ GaAs с высотой потенциального барьера 0,98 В, коэффициентом инжекции $\gamma=10^{-8}$, коэффициентом неидеальности $\eta=1,087$.

Разработанные технологии нанесения контактного материала и режимов термообработки при создании омических и инжектирующих барьерных переходов рекомендуются к использованию при изготовлении многоэлектродного МЭП-прибора с расширенными функциональными возможностями, в состав которого входят управляющие электроды, расположенные над областью распространения бегущей волны.

Ключевые слова: GaAs, омические и инжектирующие барьерные переходы, коэффициент инжекции, серебро, тройной сплав, МЭП-прибор.

ABSTRACT

Dmytriiev V. S. Ohmic and injecting barrier transitions to gallium arsenide - Manuscript.

The dissertation for the candidate of technical sciences degree (comparable to the Academic Degree of Doctor of Philosophy) on specialty 05.27.06 - Technology, equipment and production of electronic technique. - Engineering Institute of Zaporizhzhya National University, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2019.

The dissertation is devoted to the development of a technology for reproducible manufacturing ohmic and injection barrier transitions based on the silver to gallium arsenide of n-type conductivity.

The influence of various factors on the quality of ohmic and injection barrier transitions to gallium arsenide is analyzed. It is established that the physical model of the real metal-semiconductor contact (MSC) is more complicated comparing to the ideal MSC models. A model, which describes the transport processes between metal electrons, boundary states, and free semiconductor carriers has got further developed. This model can take into account any physical mechanism of charge transfer in the metal-semiconductor structure by appropriate selection of kinetic coefficients in transfer processes.

It is shown that the existing silver-arsenide gallium ohmic and injection barrier transitions producing technologies have a number of disadvantages, including the

contact parameters reproducibility lack. The investigation of the metal deposition conditions and heat treatment regimes influence on the electrophysical parameters of metal-GaAs silver-containing contacts is highlighted in an independent scientific problem whose solution can lead to a significant representations refinement of processes in metal-GaAs contacts and will allow to improve the technical characteristics and parameters of microwave GaAs devices with the Schottky barriers in particular, devices with inter-valued electronic transitions (IET-devices). Thus, the study of patterns, the development and optimization of technological regimes for the reproducible manufacturing silver-GaAs based ohmic and injection barrier transitions with optimal performance and quality characteristics for microwave devices is an important and actual problem.

The complex technological and electrophysical research of single- and multi-component metal contact systems based on the silver to $n\text{-n}^+\text{GaAs}$ have been made.

It was experimentally established that the qualitative characteristics of ohmic and injection barrier transitions depend heavily on the temperature of the substrate and the contact structure heat treatment regimes. The patterns of the specific transient resistance dependence from the temperature regimes for the creation of ohmic contacts Ag-Ge-In/ $n\text{-n}^+\text{GaAs}$ are established, which leads to the the specific transient resistance reducing to the minimum value, which is for an order smaller comparing to known analogues. It has been shown that the quality of the ohmic contact is improved if the GaAs substrate hold in dioxiacaric acid after the chemical treatment in the sulfuric acid and further anneal it in vacuum.

The technology for the production of Ag/ $n\text{-n}^+\text{GaAs}$ injecting barrier transitions are improved and optimized. It takes into account the barrier transitions forming patterns in different temperature regimes. The optimal regimes for the Schottky barrier height increasing up to 0,98 V are determined. It is established that the real current-voltage characteristics of the metal-semiconductor barrier transitions depend on their manufacturing technology. But the accuracy of the basic barrier transitions qualitative parameters (the ϕ_B barrier height and the nonideality η factor) depends not only on the accuracy of the measurement of current and voltage, but also on the method of their determination.

The Schottky barrier height determination methods based on the current-voltage characteristics using as example the Ag/ $n\text{-n}^+\text{GaAs}$ barrier transitions, produced under different heat treatment regimes, are analyzed and tested. With a small extension of the exponential part of the CVC, a direct approximation method is recommended for determining the potential barrier height.

A simplified mathematical model of the IET-device with Schottky barriers is proposed. It can be used to calculate the parameters of complicated multifunctional IET-devices with several controlling electrodes. On the basis of this model, a multi-electrode IET-device with expanded functionality has been developed. This device is capable in certain modes to perform functions of a Schottky diod, an runway wave transistor or a microwave generator, which will allow to obtain a technical and economical effect by the cost reducing for developing of a number devices for the microwave range.

Key words: GaAs, ohmic and injection barrier transitions, injection rate, silver, triple alloys, IET-devices

Підписано до друку 30.08.2019. Формат 60/90/16.
Папір офсетний. Друк ризографічний. Гарнітура Times.
Умовн. друк. арк. 0,9. Тираж 100 прим. Зам. № 177

Запорізький національний університет
69600, м. Запоріжжя, МСП-41
вул. Жуковського, 66

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготівників
і розповсюджувачів видавничої продукції
ДК № 5229 від 11.10.2016